

ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УКОРОЧЕНИЯ ТРЕХФАЗНОЙ ОБМОТКИ СТАТОРА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИНДУКТОРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В. И. МИЛЫХ*, Л. В. ШИЛКОВА

кафедра электрических машин, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина

*e-mail: mvikemkpi@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Эффективность работы цилиндрических индукторов магнитного поля определяется уровнем поля внутри их рабочей камеры. Это поле возбуждается трехфазной обмоткой статора. Электрические величины и магнитная индукция в индукторе зависят от ее укорочения. Целью данной работы является определение рационального укорочения обмотки статора. Решение задачи достигается на основе численных расчетов магнитных полей в программном пакете FEMM методом конечных элементов. Построение физико-геометрических расчетных моделей статора, расчеты магнитных полей и электромагнитных параметров индуктора автоматизированы с использованием созданного скрипта Lua, встроенного в программу FEMM. Даны картины распределения силовых линий магнитного поля при диаметральной и укороченной обмотках статора. Проводится сравнение ЭДС и напряжения обмотки, а также распределения магнитной индукции по поверхности рабочей камеры и по средней линии зубцов при разных вариантах укорочения шага обмотки.

Ключевые слова: индуктор магнитного поля; численные расчеты; укорочение обмотки статора; сравнение вариантов укорочения; магнитная индукция; электромагнитные параметры.

NUMERICAL-FIELD EVALUATION OF AN EFFICIENCY OF A SHORTENING OF A THREE-PHASE STATOR WINDING OF A CYLINDRICAL MAGNETIC FIELD INDUCTOR

V. MILYKH*, L. SHILKOVA

Department of an electrical machines, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkov, Ukraine

ABSTRACT. The efficiency of cylindrical magnetic field inductors is determined by the value of the field inside their working chamber. This field is driven by a three-phase stator winding. The electrical quantities and magnetic induction in the inductor depend on its shortening. The purpose of this work is to determine the rational shortening of the stator winding. The solution of the problem is achieved on the basis of numerical calculations of magnetic fields in the FEMM software package using the finite element method. The construction of physical and geometric design models of the stator, calculations of magnetic fields and electromagnetic parameters of the inductor are automated using the created Lua script built into the FEMM program. The pictures of the distribution of magnetic field lines with diametric and shortened stator windings are given. A comparison is made between the EMF and the winding voltage, as well as the distribution of the magnetic induction over the surface of the working chamber and along the center line of the teeth with different variants of shortening the winding pitch.

Keywords: magnetic field inductor; numerical calculations; shortening of the stator winding; comparison of shortening variants; magnetic induction; electromagnetic parameters

Введение

Цилиндрические индукторы магнитного поля (ИМП) на базе статора трехфазных асинхронных двигателей (ТАД) относятся к классу магнитных сепараторов (МС) и перемешивателей и находят применение в различных технологиях разделения и перемешивания мелких объектов с различными магнитными свойствами, что подробно представлено в [1].

В настоящее время продолжается изучение и совершенствование ИМП разнообразных конструкций путем использования численных методов расчета, применения новых материалов и конфигураций магнитов или электромагнитов и магнитопроводов.

Среди разработок такого рода отметим такие:

- в работе [2] проведено исследование влияния конфигурации магнитной системы на распределение магнитной индукции (МИ) в рабочей зоне МС;
- в работах [3–4] проведен выбор геометрических параметров магнитной матрицы МС;
- в работах [5–7] исследуется МС с постоянными магнитами разной формы; представлена численно-полевая математическая модель и результаты его экспериментального исследования;
- в работе [8] был разработан, оптимизирован и экспериментально испытан МС с открытым градиентом для очистки турбулентной проточной воды;

© В. И. Милых, Л. В. Шилкова, 2019

– в работе [9] проведено экспериментальное исследование ТАД с новой конфигурацией обмотки статора, что позволило увеличить КПД и коэффициент мощности.

Для повышения эффективности работы ИМП с трехфазной обмоткой актуальной оказывается оценка влияния ее укорочения на его электромагнитные параметры. Такое исследование ранее не было проведено и является новизной представляемой работы.

Цель работы

Данная работа посвящена определению рационального укорочения шага трехфазной обмотки статора ИМП на основе численно-полевых расчетов МП [10]. Это проведено посредством сравнения обмоток статора с диаметральной шагом и с укорочением шага на 1, 2, 3 и 4 паза. Для сравнения используются магнитное потокоцепление (МПС), ЭДС и напряжения обмотки, а также МИ в характерных точках рабочей камеры ИМП.

Объект исследования

ИМП сконструирован на базе статора ТАД с диаметральной обмоткой и рассчитан на обеспечение в режиме холостого хода (ХХ) внутри рабочей камеры равномерного МП с МИ $B = 0,24$ Тл. Этот ИМП подробнее представлен в [1]. Рабочая зона ИМП находится во внутреннем пространстве статора, где в ТАД располагался ротор. Главные размеры ИМП: активная длина $l_a = 300$ мм, радиусы расточки сердечника статора $r_{si} = 175$ мм и поверхности рабочей камеры $r_c = 165$ мм. Номинальные фазный ток $I_{sN} = 950$ А и его частота $f_s = 50$ Гц. В обмотке статора числа фаз $m_s = 3$ и пар полюсов $p = 1$, числа пазов $Q_s = 42$ и последовательных витков фазной обмотки $N_s = 28$. Обмотка статора – двухслойная, распределенная, схема соединения «звезда». Демонстрация расчетных данных проводится на статоре ИМП, варианты электромагнитной системы которого даны на рис. 1. Расчетные модели отличаются обмоткой статора: на рис. 1, а она выполнена диаметральной, т.е. относительное укорочение $\beta_s = 1$ (вариант ИМП-1), а на рис. 1, б имеет относительное укорочение на три паза, т.е. $\beta_s = 0,86$ (вариант ИМП-2). Фазные зоны обмотки статора выделены разным затемнением, а направления координат (r, α) полярной системы и токов i_A, i_B, i_C в обмотках определяются по системе, описанной в [10]. Во всех вариантах представляемого исследования значение фазного тока I_s принято равным номинальному току I_{sN} . Это являлось единой основой для сравнения вариантов расчета МП и соответствующих ему параметров ИМП.

Определение электромагнитных величин

Для исследования электромагнитных процессов в ИМП МП рассчитывалось в двухмерной постановке в его поперечном сечении (рис. 1). МП описывается дифференциальным уравнением [1] через векторный магнитный потенциал (ВМП) и рассчитывается численным

методом конечных элементов с учетом насыщения магнитопровода по программе FEMM [11], с использованием подготовленной подпрограммы на языке Lua, встроенном в эту программу. Картины МП в исходной угловой позиции $\alpha = 0$ представлены на рис. 1 силовыми линиями.

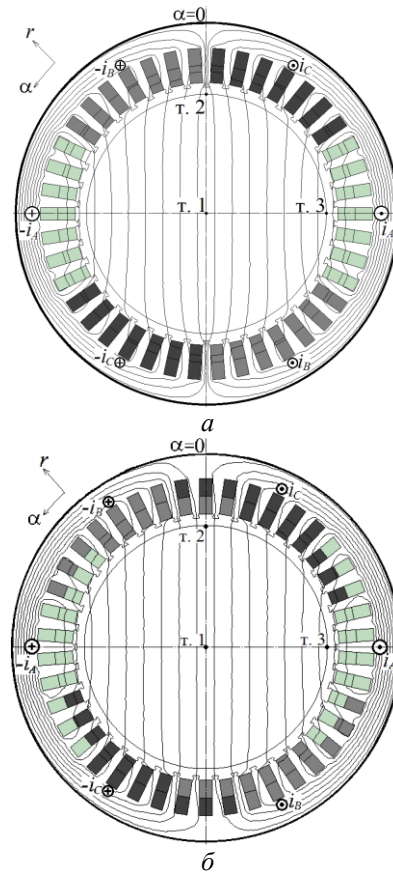


Рис. 1 – Расчетные модели ИМП: а – ИМП-1; б – ИМП-2

Эффективность работы ИМП определяется формой углового распределения радиальной составляющей МИ $B_r(\alpha)$, которое зависит от шага укорочения обмотки статора. В ходе исследования рассчитаны распределения МИ для диаметральной обмотки (вариант ИМП-1) и при ее укорочении на 1, 2, 3 и 4 паза. Выявлено, что наиболее рациональным стало укорочение на 3 паза, т.е. при относительном укорочении $\beta_s = 0,86$ (вариант ИМП-2). Распределения радиальной составляющей МИ ИМП-1 (тонкая линия) и ИМП-2 (жирная линия) по средней линии зубцов статора даны на рис. 2 а, а по поверхности рабочей камеры – на рис. 2 б (в зубцах значения взяты с учетом коэффициента заполнения сердечника сталью). Эти распределения охватывают одно полюсное деление статора; на следующем делении графики аналогичны, но со сменой знака значений МИ.

Распределение МИ на фоне синусоидальной основы на рис. 2 а имеет зубчатую форму, что обусловлено зубцово-пазовой структурой сердечника. Без

укорочения обмотки максимальное значение МИ приходится на стык фазных зон обмотки и достигает $B_{rmax1} = 1,48$ Тл. При $\beta_s = 0,86$ форма распределения МИ приобретает более сглаженный характер при максимуме $B_{rmax2} = 1,00$ Тл. Снижение максимального значения МИ позволит повысить КПД ИМП за счет уменьшения магнитных потерь в его сердечнике.

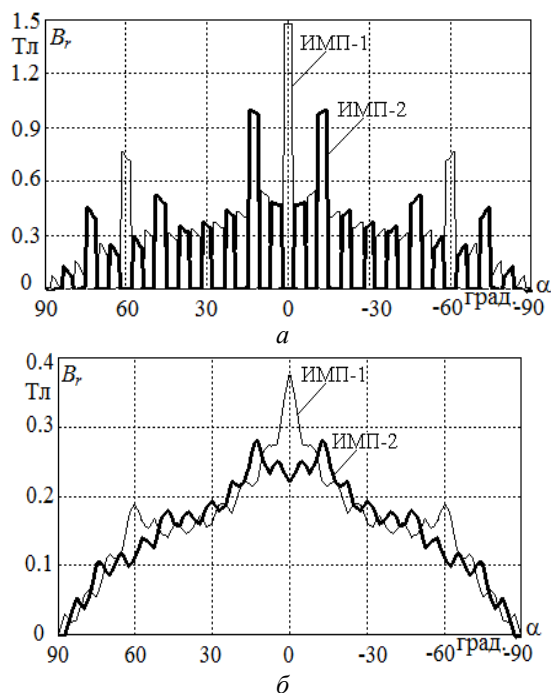


Рис. 2– Угловое распределение радиальной составляющей МИ в ИМП-1 и ИМП-2: а – по средней линии зубцов статора; б – по поверхности рабочей камеры

Распределение B_r по поверхности рабочей камеры имеет в своей основе аналогичный характер. Но здесь важно сглаживание явно выраженных пиков МИ с точки зрения недопущения притягивания в локальные зоны магнитных элементов, которое затруднило бы равномерное перемешивание ими обрабатываемого материала. Представленное распределение шага обмотки позволило уменьшить пиковое значение МИ с 0,38 до 0,28 Тл.

Причем в обоих случаях распределения на рис. 2 а и б среднее значение МИ при обусловленном укорочении обмотки практически не изменяется по сравнению с диаметральной обмоткой.

ЭДС и напряжения фазной обмотки статора определяются на основе формирования угловой функции ее МПС $\Psi_s(\alpha)$ после расчета МП. Для этого фазная обмотка условно размещается в разных угловых позициях, и каждая позиция отличается поворотами фазных зон на зубцовое деление, т.е. на угол $\Delta\alpha = 2\pi / Q_s$. Число позиций составляет $K = Q_s / 2p$ и соответствует полупериоду МПС, что обусловлено периодичностью МП, т.е. $\Psi_s(\alpha + \tau_p) = -\Psi_s(\alpha)$, где τ_p – полюсное деление в угловой мере.

В каждой позиции МПС фазной обмотки

$$\Psi_\phi = \frac{N_s I_a}{S_\phi} \int_{S_\phi} A_z dS, \quad (1)$$

где S_ϕ – площадь сечения токонесущих зон, A_z – аксиальная составляющая ВМП.

Резльтирующее значение МПС $\Psi_s = \Psi_\phi - \Psi_{\phi'}$, где знаки перед Ψ_ϕ и $\Psi_{\phi'}$ предопределены условным положительным направлением тока фазной обмотки. Таким образом, получена угловая функция МПС на ее половине периода:

$$\Psi_{sk}(\alpha_k); \quad \alpha_k = (k-1) \cdot \Delta\alpha; \quad k = 1, 2, 3, \dots K, \quad (2)$$

где k – номера угловых позиций фазной зоны.

Функция МПС может быть разложена в гармонический ряд. Амплитуда МПС первой гармоники:

$$\Psi_{m1} = \sqrt{s_1^2 + c_1^2}. \quad (3)$$

$$\text{где } s_1 = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K \Psi_{sk} \sin \alpha_k; \quad c_1 = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K \Psi_{sk} \cos \alpha_k.$$

Это позволяет, на основании закона электромагнитной индукции, перейти к действующему значению первой гармоники фазной ЭДС:

$$E_s = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega_s \Psi_{m1}, \quad (4)$$

где ω_s – угловая частота, $\omega_s = 2\pi f_s$.

Фазовый сдвиг между ЭДС и током фазной обмотки:

$$\varphi_s = \pi/2 - (\beta - \gamma_\Psi), \quad (5)$$

где β – начальная фаза токов, $\beta = 0^\circ$; γ_Ψ – начальная фаза МПС, $\gamma_\Psi = -\arctg(s_1 / c_1)$.

Активная и реактивная составляющие фазного напряжения:

$$U_{sa} = E_s \cdot \cos \varphi_s + U_r; \quad U_{sr} = E_s \cdot \sin \varphi_s + E_v, \quad (6)$$

где U_r – падение напряжения на активном сопротивлении R_s , $U_r = R_s \cdot I_s$; E_v – ЭДС от потока лобового рассеивания фазной обмотки, $E_v = -jX_v \cdot I_s$ (X_v – соответствующее индуктивное сопротивление, величина которого зависит от относительного укорочения β_s).

Действующее значение фазного напряжения:

$$U_s = \sqrt{U_{sa}^2 + U_{sr}^2}. \quad (7)$$

Модуль МИ в трех точках рабочей камеры ИМП (рис. 1 а, б), МПС, ЭДС и напряжение диаметральной ($\beta_s = 1$) обмотки статора и с укорочением ее шага на 1, 2, 3 и 4 паза, т.е. при $\beta_s = 0,95; 0,9; 0,86; 0,81$, соответственно, представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения электромагнитных величин в зависимости от относительного укорочения β_s

β_s	B т. 1, Тл	B т. 2, Тл	B т. 3, Тл	Ψ_{m1} , Вб	E_s , В	U_s , В
1	0,242	0,379	0,272	0,816	181,3	183,1
0,95	0,242	0,239	0,287	0,812	180,4	182,2
0,9	0,240	0,271	0,279	0,799	177,5	179,3
0,86	0,236	0,237	0,222	0,777	172,7	174,6
0,81	0,232	0,267	0,224	0,748	166,2	168,2

Проведенные расчеты выявили, что наиболее равномерное МП получается при относительном укорочении $\beta_s = 0,86$. При этом снижение МИ оказываются в допустимых пределах, а величины МПС, ЭДС и напряжения обмотки статора имеют выявленный уровень уменьшения.

Выводы

1. Численный расчет МП является эффективным для расчета и анализа электромагнитных параметров ИМП, а также исследования влияния на них укорочения обмотки статора.

2. При переходе от диаметральной к укороченной на три паза обмотки статора существенно улучшается форма углового распределения МИ, что позволит повысить КПД и эффективность работы ИМП.

3. МПС, ЭДС и напряжение обмотки статора при сохранении ее тока и ее укорочении заметно уменьшаются в выявленных пределах.

Список литературы

1. Милых, В. И. Численно-полевой расчет моментной угловой характеристики трехфазного индуктора магнитного поля электромагнитного перемешивателя для обработки разнородных смесей / В. И. Милых, Л. В. Шилкова // *Problemele energeticii regionale*. – 2019. – № 1-2 (42). – С. 55–64. – doi: 10.5281/zenodo.3239174.
2. Gerlici, J. Исследование влияния конфигурации магнитной системы сепаратора на постоянных магнитах на распределение магнитного поля в рабочей зоне / J. Gerlici, И. А. Шведчикова, И. В. Никитченко, Ю. А. Романченко // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2017. – № 2. – С. 13–17. – doi: 10.20998/2074-272X.2017.2.02.
3. Шведчикова, И. А. Исследование закономерностей структурообразования полиградиентных сред / И. А. Шведчикова, И. А. Луценко, Ю. А. Романченко // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2015. – вып. 4, № 7 (76). – С. 62–67. – doi: 10.15587/1729-4061.2015.47785.
4. Gerlici, J. Визначення раціональних геометричних параметрів пластинчастих елементів магнітної матриці поліградієнтного сепаратора / J. Gerlici, И. А. Шведчикова, Ю. А. Романченко И. В. Никитченко // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2018. – № 4. – С. 58–62. – doi: 10.20998/2074-272X.2018.4.10.

5. Dimova, T. Investigation of the magnetic field of a separator with specific configuration of the magnetic filter / T. Dimova, M. Marinova, B. Aprahamian // *IEEE Conference Publications "19th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)"*. Bulgaria. – 2016. – pp. 1–4. – doi: 10.1109/SIELA.2016.7542989.
6. Dimova, T. 3D modeling of the magnetostatic field in separation apparatus / T. Dimova, M. Streblau, B. Aprahamian // *IEEE Conference Publications "15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)"*. Bulgaria. – 2017. – pp. 1–4. – doi: 10.1109/HiTech.2018.8566294.
7. Dimova, T. Investigation of the exploitation modes of a special type magnetic separator / T. Dimova, M. Marinova, B. Aprahamian, M. Marinov // *IEEE Conference Publications "2018 International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech)"*. Bulgaria. – 2018. – pp. 444–447. – doi: 10.1109/ELMA.2017.7955482.
8. Abdallah, B. Design with optimization of a magnetic separator for turbulent flowing liquid purifying applications / B. Abdallah, R. Mehasni, M. Ouil, M. Feliachi, M. El-Hadi Latreche // *IEEE transactions on magnetics*. – August 2015. – vol. 51, no. 8. – doi:10.1109/TMAG.2015.2424401.
9. Kishor, S. Design and development of three phase induction motor using written pole technology / S. Kishor, Dr. Prof. K. Bansal, Dr. A. Killedar // *JOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*. – Sep - Oct 2016. – vol. 11, is. 5, ver. III. – pp. 49–56. – doi: 10.9790/1676-1105034956.
10. Милых, В. И. Численно-полевая оценка эффективности укорочения обмотки статора турбогенератора / В. И. Милых, Н. В. Полякова // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2014. – № 4. – С.12–16. – doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.02.
11. Meeker, D. Finite element method magnetics: OldVersions. 11 October 2010. Режим доступа: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions>. (дата обращения 21.10.2016).

References (transliterated)

1. Milykh, V. I., Shilkova, L. V. Chislenno-polevoy raschet momentnoy uglovoy karakteristiki trehfaznogo induktora magnitnogo polya elektromagnitnogo peremeshivatelya dlya obrabotki raznorodnykh smesey [Numerically-field calculation of the angle torque characteristic of the three-phase inductor of the magnetic field of the electromagnetic stirrer for processing dissimilar mixtures]. *Problemele energeticii regionale [Problems of regional energy]*, 2019, **1-2** (42), 55–64, doi: 10.5281/zenodo.3239174.
2. Gerlici, J., Shvedchikova, I. A., Nikitchenko, I. V., Romanchenko, J. A. Issledovanie vliyaniya konfiguratsii magnitnoy sistemy separatora na postoyannyyh magnitah na raspredelenie magnitnogo polya v rabochey zone [Investigation of influence of separator magnetic system configuration with permanent magnets on magnetic field distribution in working area]. *Elektrotehnika i Elektromekhanika [Electrical engineering & electromechanics]*, 2017, **2**, 13–17, doi: 10.20998/2074-272X.2017.2.02.
3. Shvedchikova, I. A., Lutsenko, I. A., Romanchenko, J. A. Issledovanie zakonornostey strukturo-obrazovaniya poli-gradiyentnykh sred [A study of polygradient media structure regularities]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovoykh tehnologiy [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies]*, 2015, **4**, 7 (76), 62–67, doi: 10.15587/1729-4061.2015.47785.

4. Gerlici, J. Shvedchikova, I. A., Romanchenko, J. A., Nikitchenko, I. V. Vy'znachennya racional'ny'x geometry'chny'x parametriv plasty'nchasty'x elementiv magnitnoyi matry'ci poligradiyentnogo separatora [Determination of the rational geometrical parameters of plate type elements of magnetic matrix of the polygradient separator]. *Elektrotehnika i Elektromekhanika [Electrical engineering & electromechanics]*, 2018, **4**, 58-62, doi: 10.20998/2074-272X.2018.4.10.
5. Dimova, T., Marinova, M., Aprahamian, B. Investigation of the magnetic field of a separator with specific configuration of the magnetic filter. *IEEE Conference Publications "19th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)"*. Bulgaria, 2016, 1-4, doi: 10.1109/SIELA.2016.7542989.
6. Dimova, T. Streblau, M., Aprahamian, B. 3D modeling of the magnetostatic field in separation apparatus. *IEEE Conference Publications "15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)"*. Bulgaria, 2017, 1-4, doi: 10.1109/HiTech.2018.8566294.
7. Dimova, T., Marinova, M., Aprahamian, B., Marinov, M. Investigation of the exploitation modes of a special type magnetic separator. *IEEE Conference Publications "2018 International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech)"*. Bulgaria, 2018, 444-447, doi: 10.1109/ELMA.2017.7955482.
8. Abdallah, B., Mehasni, R., Ouil, M., Feliachi, M., El-Hadi Latreche, M. Design with optimization of a magnetic separator for turbulent flowing liquid purifying applications. *IEEE transactions on magnetics*, August 2015, **51**, 8, doi:10.1109/TMAG.2015.2424401.
9. Kishor, S. Dr. Prof. Bansal, K., Dr. Killedar, A. Design and development of three phase induction motor using written pole technology. *JOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, Sep - Oct 2016, **11**, 5, III, 49-56, doi: 10.9790/1676-1105034956.
10. Milykh, V., Polyakova, N. Chislenno-polevaya ocenka jefektivnosti ukorochenija obmotki statora turbogeneratora [Numerical field estimation of turbogenerator stator winding shortening efficiency] *Elektrotehnika i Elektromekhanika [Electrical engineering & electromechanics]*, 2014, **4**, 12-16, doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.02.
11. Meeker, D. Finite element method magnetics: OldVersions. 11 October 2010. Available at: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions>. (accessed 21.10.2016).

Сведения об авторах (About authors)

Милых Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры электрических машин, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; г. Харьков, Украина; ORCID:0000-0002-6176-3103; e-mail: mvikemkpi@gmail.com.

Vladimir Milykh – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Chair of the Department of Electrical machines, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6176-3103; e-mail: mvikemkpi@gmail.com.

Шилкова Лариса Васильевна – аспирант, старший преподаватель кафедры электрических машин, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; ORCID: 0000-0003-0009-3502; e-mail: larisa_lv@ukr.net.

Larisa Shilkova – Ph. D. student, Senior Lecturer of the Department of Electrical machines, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0009-3502; e-mail: larisa_lv@ukr.net.

Please cite this article as:

Милых, В. И. Численно-полевая оценка эффективности укорочения трехфазной обмотки статора цилиндрического индуктора магнитного поля / **В. И. Милых, Л. В. Шилкова** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Электрические машины и электромеханическое преобразование энергии*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 172-176. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.25.

Please cite this article as:

Milykh, V., Shilkova, L. Numerical-field evaluation of an efficiency of a shortening of a three-phase stator winding of a cylindrical magnetic field inductor. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Electric machines and electromechanical energy conversion*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **20** (1345), 172-176, doi:10.20998/2409-9295.2019.20.25.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Мілих, В. І. Чисельно-польова оцінка ефективності укорочення трифазної обмотки статора циліндричного індуктора магнітного поля / **В. І. Мілих, Л. В. Шилкова** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Електричні машини та електро механічне перетворення енергії*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 172-176. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.25.

АНОТАЦІЯ Ефективність роботи циліндричних індукторів магнітного поля визначається рівнем поля всередині їх робочої камери. Це поле збуджується трифазною обмоткою статора. Електричні величини і магнітна індукція в індукторі залежать від її укорочення. Метою даної роботи є визначення раціонального укорочення обмотки статора. Рішення завдання досягається на основі чисельних розрахунків магнітних полів в програмному пакеті FEMM методом кінцевих елементів. Побудова фізико-геометричних розрахункових моделей статора, розрахунки магнітних полів і електромагнітних параметрів індуктора автоматизовані з використанням створеного скрипта Lua, вбудованого в програму FEMM. Дані картини розподілу силових ліній магнітного поля при діаметральній і укороченій обмотках статора. Проводиться порівняння ЕРС і напруги обмотки, а також розподілу магнітної індукції по поверхні робочої камери і по середній лінії зубців при різних варіантах укорочення кроку обмотки.

Ключові слова: індуктор магнітного поля; чисельні розрахунки; укорочення обмотки статора; порівняння варіантів укорочення; магнітна індукція; електромагнітні параметри

Надійшла (received) 30.07.2019